



TITLE:

ケトラーとマクスウエル: 社会物理学から統計物理学へ (量子確率論とエントロピー解析)

AUTHOR(S):

豊田, 利幸

CITATION:

豊田, 利幸. ケトラーとマクスウエル: 社会物理学から統計物理学へ (量子確率論とエントロピー解析). 数理解析研究所講究録 1998, 1066: 109-120

ISSUE DATE:

1998-10

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/62482>

RIGHT:

ケトレーとマクスウエル：社会物理学から統計物理学へ

豊田利幸 (Toshiyuki Toyoda)

「はじめに

ここでお話しますことは、量子確率論の前史ともいえるべき物理確率論誕生について最近私が気づいた一つのエピソードであります。端的にいいますと、ニュートン力学全盛の時代に、マクスウエルがどのような契機で気体分子のエネルギー分布式を考えるに至ったか、その背景と経緯を彼が残した手紙をもとに紹介することです。これは単なる昔話ではなく、これからの物理学研究の方向を考える上で有益な示唆を与えてくれるように思われます。

実は前回の講演「情報理論誕生の歴史：渡辺慧先生の業績」（1997. 3. 11）の冒頭で触れました赤池弘次さんの思い出「Adolphe Quételet(1796-1874) の Social Physics (1835) から James C. Maxwell (1831) や Ludwig Boltzmann (1844-1906) にいたるまでそれぞれの原論文を読まれ、非常に感動された」ことを伺い、私が 30 年以上前コペンハーゲンのニールス・ボーア研究所に滞在中 Léon Rosenfeld (1904-1974) さんから聞き好奇心を持ちながら、その頃時間的余裕がなかったためそのままにしていた Quételet の Social Physics を今年になって読み始めました。そしてこのほど "Essay on Quételet and Maxwell: From la physique sociale to statistical physics" と題する小文を脱稿したところです。貴重なお時間を頂きましたので、本日はその触りの部分を話させて頂きたいと思います。

ケトレーの時代的背景

よく知られていますように、Johannes Kepler (1571. 12. 27 - 1630. 11. 15) は、Tycho Brahe (1546. 12. 14 - 1601. 10. 24) が長年にわたって蓄積した、肉眼による恒星、惑星、および彗星の膨大な観測データを整理分析して、惑星運動の三法則、

- (1) 惑星は太陽を一つの焦点とする楕円軌道を描く、
- (2) 惑星と太陽を結ぶ動径は単位時間内に同一面積を掃過する、

(3) 惑星の公転周期の二乗はその惑星の近日点と遠日点を結ぶ長径の長さの半分の三乗に比例する、

を発見しました。気の遠くなるような夥しい数字の羅列から惑星運動の本質を見い出したケプラーの頭脳はまさに驚異的であります。しかしここで忘れてならないのはブラーエがその生涯をかけて集積した膨大な観測データの存在であります。

ケプラーの三法則は 1687 年 Issac Newton (1642. 12. 25 - 1727. 3. 19) の *Philosophiae naturalis principia mathematica* によって数学的に明快に証明されることになりますが、そこではケプラーの第三法則と Christiaan Huygens (1629. 4. 14 - 1695. 4. 14) が導いた遠心力を組み合わせることによって引力の逆二乗法則が発見されています。

ニュートンが作り上げた力学体系は、惑星運動だけでなく地上の物体の運動も包括的に説明できるため、その理論は一世を風靡するようになりました。しかしその理論に直接もとづく天文学上の発見に関しては、私の知るかぎりそれほど多くはありません。著名なこととしては、1781 年 William Herschel (1738. 11.15 - 1822. 3. 29) が自作の反射望遠鏡で発見した天王星の軌道観測値が、ニュートン力学で精密に計算したものからずれていたため、天王星の外側に未知の惑星の存在が予言され、それが海王星として発見されたことと、次に述べます Carl Friedrich Gauss (1777. 4. 30 - 1855. 3. 25) のエピソードぐらいではないでしょうか。

ガウスは 1807 年ゲッティンゲン大学の天文台長兼教授になり、1809 年 *Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solum Ambientium* (太陽の周りを円錐曲線を描いて運動している天体の理論) を刊行し、その最後の節にいわば付録として最小二乗法の確率論的導出のため正規分布式の説明を載せました。このことにつきましては後でまた触れることになりましょう。実はそれより前の 1801 年、たまたまその年 G. Piazzi が発見しながら、しばらく追跡した後見失ってしまった小惑星ケレスについて、ガウスは早速ニュートン力学を使って軌道計算を行ない、この小惑星再出現のデータを求め、その位置を見事に的中させて名声を博したと伝えられています。なおガウスはその年、整数論に全く新しい時代を画したといわれる *Disquisitiones arithmeticae* を出していることを付け加えておきましょう。

ニュートン力学は数学者の強い関心を惹き、ガウス以前にも Pierre Simon Laplace (1749. 3. 28 - 1827. 3. 5) は天体運動を解析的に説明する仕事に取り組み、1799 年から 1825 年にかけて 4 巻よりなる大著 *Traité de mécanique céleste* (天体力学) を刊行しました。

しかしその頃ハーシェルによる天王星および土星それぞれの衛星の発見、さらに 800 個にのぼる二重星と 2500 個の星雲・星団の発見があり、天文学の進展、あるいは宇宙の理解のためには、天体観測が不可欠であると思われるようになっていました。そして新しい光学機器をそなえた天文台がヨーロッパ各地に建設されるようになりました。当然のことながら、観測データを有効に処理する方法が模索されました。

ニュートン力学に依拠して天体の運動を数学的に導くことに多大の精力を注ぎこんでいたラプラスも、観測データの扱い方に確率論的考察を適用することを考えるようになり、それを普及するため、1812 年に *Théorie analytique des probabilités* を、1814 年にその啓蒙書ともいうべき *Essai philosophique sur les probabilités* を出版しました。しかしここでいう確率論的考察とは誤差論、すなわち「真の値」と観測値の差を「誤差 (error)」と呼び、その確率論的処理によって観測値の集団からいかにして真の値を見出すかにあり、集団に存在する揺動 (fluctuation, Schwankung) にはほとんど関心が払われませんでした。たとえば、ラプラスは、確率論が必要となるのは人知が不十分であるためで、ある瞬間における宇宙のすべての原子の位置と速さを知ることができれば、未来永遠にわたって宇宙がどうなるかは、解析学の力によって知ることができるであろう、と述べたと伝えられています。

すぐ後の話に関係がありますので、同時代の人でありながらラプラスと対蹠的な道を歩んだ Jean Baptiste Joseph Fourier (1768. 3. 12 - 1830. 5. 16) に短く触れておきましょう。フーリエはニュートン力学の対象になりにくかった熱現象の数学的処理に挑戦し、1807 年、今日彼の名を冠して呼ばれるフーリエ級数を導入して熱拡散の偏微分方程式を解き、1810 年、フーリエ積分を導入して熱伝導の理論を完成したことはよく知られています。その彼が 1829 年に *Recherches statistique sur la ville de Paris et le département de la Seine* (パリの町とセーヌ地方についての統計的研究) を発表していることを心にとめておいて下さい。

ケトレーの仕事

ケトレーは現在のベルギーのアントワープで 1796 年 2 月に生まれましたが、当時はオーストリアの支配下にあり、それからの独立をかちとると、今度はオランダに支配され、ようやく 1831 年 2 月に独立国となりました。これからわかりますように、ケトレーは青年時代を激動する社会の中で過ごしました。それに彼は七才で父を失い、厳しい経済条件のもとで苦学しなければならませんでした。

彼は 1819 年、円錐曲線の理論に関する論文でアントワープ大学から博士の学位を授与され、

その数学における業績で翌 1820 年ブラッセルの王立科学アカデミー (Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles) のメンバーに推挙されました。

その頃ウィリアム・ハーシェルの天文学上の輝かしい諸発見に感動していたケトレーは 1823 年、ベルギー政府に天文台を建設するよう勧告書を提出しました。その時彼は 27 才でした。政府はその勧告を受け入れ、天文台建設の準備調査のためその年 12 月、ケトレーをパリに派遣しました。

パリ滞在はわずか 3 ヶ月でしたが、ケトレーのその後の生き方に大きな影響を与えました。彼は先ずパリ天文台で Dominique François Jean Arago (1789. 2. 26 - 1853. 10. 2) と Alexis Bouvard (1787.6.27 - 1843.6.7) から観測天文学 (observational astronomy) と天文台運営の仕方を学び、ついでボワールの紹介でフーリエとラプラスに会い、当時最先端の数学、とくに確率論に触れることができました。その時ラプラスは 74 才で大著『天体力学』の最終巻を刊行する直前でしたが、その彼が天体力学と性格が異なるように見える確率論になみなみならぬ関心をもっていることを知り、若いケトレーは深い感銘を受けたようです。またフーリエからは、「自然の深い研究こそ数学上の発見のもっとも豊かな源泉である」という彼の信条を聞き、いたく感動したと伝えられています。

ついで 1827 年ケトレーは天文観測用のさまざまな機器を購入するためロンドンに赴き、その機会にイングランドとスコットランドの天文台を訪ねました。正確な記録を私はまだ見ていませんが、スコットランドではエディンバラ大学天文台長をしていたジョン・ハーシェルに会ったことはほぼ確実です。ジョン・ハーシェルはウィリアム・ハーシェルの息子で 1834 年から 38 年まで南アフリカのケープタウンの天文台で南天の恒星や星雲星団を観測し、その後エディンバラへ移ってきていました。このことが後年マクスウェルがケトレーの仕事に接する機縁となるとは運命の不思議を思わずにはおれません。

さて独立の夜明け前の多事多難な社会状況のもとで天文台の建設は 1832 年まで遅れましたが、その間政府はケトレーに行政に将来必要な人口を含む住民の生活動態に関する様々な定量的データの調査を依頼しました。

まだオランダの統治下にある困難な条件のもとで、彼はこの調査事業に真剣に取り組み、多くの独創的な統計の方法を工夫して見事にその事業を達成しました。その成果は次の二つの論文に反映しているだけでなく、すぐ後で述べます彼の画期的な著書『社会物理学』の土台になりました。

- (1) Recherches sur la population, les naissances, les décès, les prisons, les

dépôts de mendicité, etc., dans le royaume des Pays-Bas. (オランダ王国における人口、出生、死亡、刑務所、貧民収容所、その他、についての調査研究)

(2) Sur la probabilité de mesurer l'influence des causes qui modifient les éléments sociaux. (社会的要素を変える原因の影響度の確率について)

ケトレーの主著は 1835 年にパリで *Sur l'homme et le développement de ses facultés, ou essai de physique sociale* (人間とその諸能力の発達について、いいかえれば社会物理学についての試論) と題して出版され、まもなく統計学の原典として各国語にによる翻訳がでました。日本でも岩波文庫『高野岩三郎校閲平貞蔵・山村喬訳 ケトレー 人間に就いて 上・下』として 1940 年に出ています。その年私は大学に入り物理学の勉強を始めたところでしたし岩波文庫にも親しんではいましたが、訳題からこれが「社会物理学」の本であるとは想像もしませんでした。したがって、その本を手にもすることもありませんでした。

さて上記の本の英訳は *A Treatise on Man and the development of his faculties* と題して 1842 年エディンバラ大学から出版されました。これは前に触れましたジョン・ハーシェルの勧めで実現したといわれています。事実、彼は *Quetelet on Probabilities* と題する論文を *Edinburgh Review*, 92 (1850) に書き、その中で上記ケトレーの本の紹介を行なっています。当時 19 才でまだエディンバラ大学 4 年生であったマクスウエルは、指導教授で天文学に関心をもちハーシェルとも親しかった James Forbes の勧めでこの論文を読み、おそらくケトレーの原著の上記英訳本を見たものと思われます。その年 10 月マクスウエルはケンブリッジ大学に移りますが、その前の 7 月頃スコットランドのグレンレアーから友人の Lewis Campbell に書いた長文の手紙には、その時の感動が生き生きと記されています。これにつきましては節をあらためてお話することにしましょう。

さてケトレーの『社会物理学』の内容を私なりに短く紹介する前に、ハーシェルによるケトレーの仕事についての評価の文章に触れておきましょう。それははいかにも長年天体観測を行なってきた研究者らしい筆致で次のように書かれています。

No one has exerted himself to better effect in the collection and scientific combination of physical data in those departments which depend for their progress on the accumulation of such data in vast and voluminous masses, spreading over many succeeding years, and gathered from extensive

geographical districts, — such as Terrestrial Magnetism, Meteorology, the influence of climates on the periodical phenomena of animal and vegetable life, and statistics in all the branches of that multifarious science, political, moral, and social.

1835 年に出版されたケトレーのその本はフランス語で書かれた哲学の名著シリーズの一巻として、そのリプリント版が 1991 年パリで出版されたことからわかりますように、仏文としても高い評価を受けています。

この本の 6 章からなる序論を何度も読み返して、その度に私の脳裏に去来したのは、恩師湯川秀樹先生と渡辺慧先生の次の言葉でした。

湯川先生は莊子の言葉「原天地之美、而達萬物之理」（外篇 第二十二 知北遊篇）を引いて、物理という言葉はここからきている、といわれました。試みに『角川大字源』を引いてみますと、物（ブツ）は意符の牛（うし）と音符の勿（ブツ、ふぞろい）から、また理（リ）は意符の玉（たま）と音符の里（リ、裂け目）から成っている、とあります。したがって萬の字をつけて考えますと、「夥しい数のふぞろいな牛の集まりの基本的な性質を見い出すこと」が「物理」の語源であります。なおケトレーの考え方の土台になっていると思われる「天」の解字にも触れておきましょう。この字は人の体を正面から見て、特にその頭部をはっきりさせたさまにかたどったものであります。また「美」は大きい羊で、肥えた羊の肉はおいしいから、うまい、よい、うつくしい、の意味に使われるようになりました。

渡辺先生は晩年「学は一つなり (Science is one.)」という言葉を私にくださいました。

ケトレーは人間とその能力の発達、いいかえれば観測手段の発達による人間の経験範囲の拡大を重視し、できるだけ多くの人と協力して、天体、気象はもちろん人間社会を含む地上の諸現象を実際に観測し、そのデータを収集することの必要性を力説しました。

彼は序論の冒頭で、これまで長い間尊敬すべき賢人たちが諸事実の数量的考察を避けて行なってきた思弁的な学問 (sciences speculatives) について語ろうとは思わない、とはっきり断っています。

そして膨大な観測データを整理して統一的に把握あるいは理解するためには、従来の先験的な論理の枠組みにとらわれてはならないことを示唆しました。このことは、それから約百年後、量子力学の理論構築にあたって、分配律をもつ先験的な論理の枠組みであるブール束からより自由なモデューラ束が用いられたことによっても実証されました。

私が最も感銘を受けたのは、序論第五節「本書の目的について」の冒頭の文章であります。まず原文をお目にかけます。

L'objet de cet Ouvrage est d'étudier, dans leurs effets, les causes, soit naturelles, soit perturbatrice qui agissent sur le développement de l'homme; de chercher à mesurer l'influence de ces causes, et le mode d'après lequel elles se modifient mutuellement.

Je n'ai point en vue de faire une théorie de l'homme, mais seulement de constater les faits et les phénomènes qui le concernent, et d'essayer de saisir, par l'observation, les lois lient ces phénomènes ensemble.

L'homme que je considère ici est, dans la société, l'analogie du centre de gravité dans les corps; il est la moyenne autour de laquelle oscillent les éléments sociaux: ce sera, si l'on veut, un être fictif pour qui toutes les choses se passeront conformément aux résultats moyens obtenus pour la société. Si l'on cherche à établir, en quelque sorte, les bases d'une *physique sociale*, c'est lui qu'on doit considérer, sans s'arrêter aux cas particuliers ni aux anomalies, et sans rechercher si tel individu peut prendre un développement plus ou moins grand dans l'une de ses facultés.

《この著作の目的は、人間の発達に影響を及ぼす効果や原因、それらが自然的なものであれ、摂動的なものであれ、それらを研究することにある。それは諸原因の影響とそれらが相互に変更しあう様子を測定するための研究である。》

私は人間についてのある理論を作ろうという視点をもってはいない。ただ、人間の行為とそれに関する現象を確かめ、それらの現象の集まりを結び付ける法則を観測によって掴もうと試みるだけである。

私がここで考察する人間とは、社会の中において、物体の重心と類似した存在である。それはそのまわりで社会的諸要素が振動している平均値のようなものである。もしお望みならば、それはすべての選択が社会について得られる平均的結果に一致するように行なわれている想像上の存在である、といってよい。もしわれわれが、いわば社会物理学の基礎を築こうと思うならば、ここで定義した人間を考察すべきであり、特殊な場合や異常なことがらに拘泥したり、ある個人がその能力のあるものについて多少他人より優れた発達を遂げらるかどうかなどを調べようとしてはならない。（豊田仮訳）》

マクスウエルの仕事

エディンバラで生まれそこで育ったマクスウエルは少年時代から数学が好きで、近所の装飾画家 (decorative painter) D. R. Hay の仕事ぶりからヒントをえて、卵形曲線の作図法を考えました。それは彼が 15 才の時で、その頃彼はすでに円錐曲線の勉強を始めていました。その経緯は略しますが、このことがエディンバラ大学のフォーブス教授 (J. D. Forbes) の耳に入り、独創的な新しい仕事だと思うから大学の紀要に載せよう、といわれました。こうして書かれたのが、James Clerk Maxwell, *Observations on circumscribed figures having plurality of foci, and radii of various proportions*, *Proceedings of the Edinburgh Royal Society*, vol. ii. pp. 89–93, 1846. です。マクスウエルがエディンバラのカレッジに入学したのはその一年後の 1847 年 11 月で、以来フォーブスはマクスウエルの類稀な数理的素質をのぼすためたえず心を配ってきました。前に述べましたマクスウエルとケトレーの仕事との出会いはフォーブスの示唆によるものです。

マクスウエルはカレッジのカリキュラムでカントの『純粋理性批判』やホッブスの『レヴィアサン』を読み、*metaphysics* や *moral philosophy* に内心少なからぬ違和感、あえていえば嫌悪感を抱いたようです。このことは、前に触れました 1850 年 7 月頃友人キャンベルに書いた長い手紙に具体的にそして実に率直に述べられています。残念ながら時間の都合でその部分の紹介は割愛させていただきます。繰り返しになりますが、その手紙はケトレーの『社会物理学』を初めて読み、その興奮が醒めやらぬ時に書かれたものです。

その手紙の最後のパラグラフで、彼がそれまで習った確率論、そのなかにはラプラスのものも含まれますが、それからの訣別が青年らしい率直さで宣言されています。ケトレーの名は明示されてはいませんが、この文章の基調はケトレーの本の序論のそれと全く同じといってよいと思います。

As it is Saturday night I will not write very much more. I was thinking today of the duties of the cognitive faculty. It is universally admitted that duties are voluntary, and that the will governs understanding by giving or

withholding Attention. They say that Understanding ought to work by the rules of right reason. These rules are, or ought to be, contained in Logic; but the actual science of Logic is conversant at present with things either certain, impossible, or entirely doubtful, one of which (fortunately) we have to reason on. Therefore the true Logic for this world is the Calculus of Probabilities, which takes account of the magnitude of probability (which is, or which ought to be in a reasonable man's mind). This branch of Math., which is generally thought to favour gambling, dicing, and wagering, and therefore highly immoral, is the only 'Mathematics for Practical Men', as we ought to be. Now, as human knowledge comes by senses in such a way that the existence of things external is only inferred from the harmonious (not similar) testimony of the different senses. Understanding, acting by the law of right reason, will assign to different truths (or facts, or testimonies, or what shall I call them) different degrees of probability. Now as the senses give new testimonies continually, and as no man ever detected in them any real inconsistency, it follows that the probability and *credibility* of their testimony is increasing day by day, and the more a man uses them the more he believes them. He believes them. What is believing? When the probability (there is no better word found) in man's mind of a certain proposition being true is greater than that of its being false, he believes it with a proposition of faith corresponding to the probability, and this probability may be increased or diminished by new facts. This is faith in general. When a man thinks he has enough of evidence for some notion of his he sometimes refuses to listen to any additional evidence pro or con, saying, 'It is settled question *probatis probata* ; it needs no evidence it is certain.' This is knowledge as distinguished from faith. He says, 'I do not believe; I know.' 'If any man thinkth that he knowth, he knowth yet nothing as he ought to know.' This

knowledge is a shutting of one's ear to all arguments, and is the same as 'Implicit faith' in one of its meanings. 'Childlike faith', confounded with it, is not credulity, for children are not credulous, but find out sooner than some think that many men are liars. I must now to bed, so good night; only please to write when you get this, if convenient, and state the probability of your coming here. We perhaps well be in Edinburgh when the Wise men are there. Now you are invited in a corner of a letter by

JAMES CLERK MAXWELL.

*The meeting of the British Association for Advancement of Science at Edinburgh in July and August 1850.

(underline by T.T.)

私は 19 才になったばかりのマクスウエルがその頃習っていた確率論を非常に不道德な (highly immoral) 学問と断じ、真の確率論は実践的な人間のための数学の分野である、と述べているのに深い感銘を覚えました。ここでいう実践的な人間 (Practical Men) とは空理空論に耽っている人間に対置される概念で、何よりも観察あるいは測定を重んじ、その解釈にあたっては既存の権威から自由な人間をさします。

ケンブリジ大学に移ったマクスウエルはそこでファラデー、トムソン、ストークス等当時第一級の物理学者たちにあい彼らの研究に直接触れ、さまざまな自然現象とその理論的解釈に旺盛な研究意欲をもちました。なかでもファラデーが、自ら発見した電磁気現象説明のために工夫した「ファラデーの力線 (Faraday's lines of force)」に強い関心を抱き、その数学的定式化に全力をあげることになります。この仕事は 1865 年 A dynamical theory of electromagnetic field として完成し、現代物理学の金字塔となったことはここで申しあげる必要はないと思います。

マクスウエルは 1854 年、師のウィリアム・トムソンからガウスの曲面論の存在を知らされ、それによって空間の曲線や曲面の数学的扱い方を学び、1855 年 12 月に彼の電磁気学の第一論文ともいうべき On Faraday's lines of force, Part I を発表し、以後その発展に没頭していました。

その間たまたま 1858 年、Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822. 1.2 - 1888. 8.

24) の Über die mittlere Länge der Weg, welche bei der Molecularbewegung gasformiger Körper von den einzelnen Moleculen zurückgelegt werden; nebst einigen anderen Bemerkungen über die mechanische Wärmetheorie, Ann. Phys., 105 (1858) pp. 239-58 がでました。そしてその英訳 On the mean length of the paths described by the separate molecules of gaseous bodies on the occurrence of molecular motion: together with some other remarks upon the mechanical theory of heat が Phil. Mag. 17 (1859) pp. 81-91 に載り、同年 2 月に発行されました。

これを読んだマクスウエルの脳裏には 19 才の時ケトレーの仕事から受けた強烈な印象が鮮やかに蘇ってきました。彼は直ちに筆をとり、クラウジウスの論文の誤りを具体的に指摘した上で、後に彼の名を冠して呼ばれる「分布式」を提案する手紙を同年 5 月 30 日付けで George Gabriel Stokes (1819. 8. 13 - 1903. 2. 1) に出しました。ストークスは申すまでもなく流体力学の大家で物理学に直結する数学の分野で多くの業績をあげていました。マクスウエルはその手紙を出して 4 ヶ月後にスコットランド北方の港町アバディーンで開かれた学会で「気体分子の速度分布」について講演するとともに Illustrations of the dynamical theory of gases, Part I, II, III という題の論文を翌 1860 年の Phil. Mag. にたて続けに発表しました。

まずマクスウエルのストークス宛てのその手紙の要点を説明しておきましょう。

彼は気体モデルとして同じ半径をもった多数の完全弾性体球が完全弾性壁で囲まれた容器の中に一定密度で存在するとします。平均自由行路はもちろん確率的な概念ですが、クラウジウスは一つの球が一定速度である距離進んだ時他の一つの球に衝突する場合、その距離を確率的に計算しました。そのさい彼はすべての球は同じ速さをもっていると仮定しました。おそらく彼は理論的議論に用いるモデルは簡単なものほどよいと思っていたからでしょう。彼ほどの人ですから数式の計算などに誤りはありません。

マクスウエルが行なったのは、クラウジウスの理論をそのまま用いて気体の内部摩擦や気体における熱伝導を計算し、それらの結果が物理的にいかに不自然なものであるか、具体的に示すことでした。その箇所を彼自身に語らせましょう。

This is certainly very unexpected, that the friction should be as great in a rare as in a dense gas. The reason is, that in the rare gas the mean path greater, so that frictional action extends to greater distances.

Have you the means of refuting this result of the hypothesis?

Of course my particles have not all the same velocity, but the velocities are distributed according to the same formula as the errors are distributed in the theory of 'least squares'.

If two sets of particles act on each other the mean vis viva of a particle will become the same for both, which implies, that equal volumes of gases at same press. & temp. have the same number of particles, that is, are chemical equivalents. This is one satisfactory result at least.

上の文章にあります vis viva というラテン語は「活力」を意味し、当時「運動エネルギー」の術語として使われていました。

それまで誤差の量的扱いにのみ使うものとされていたガウスの分布式を、気体分子の集団を全体として把握するため、いいかえれば統計的に扱うために、用いるというマクスウエルのこの画期的な考えの背景には、彼が若き日にケトレーの仕事から受けた感動が存在することはほとんど間違いありません。

前に述べましたようにマクスウエルのこの仕事はその翌年 Phil. Mag. に発表され、Ludwig Boltzmann (1844. 2. 20 - 1906. 9. 5) に少なからぬ衝撃を与えました。ボルツマンはマクスウエルの速度分布式を外場のある場合に拡張して、1868 年, Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten を発表しました。lebendige Kraft は前に説明しました vis viva のドイツ語訳で運動エネルギーのことです。

最後にボルツマンがいかにマクスウエルを高く評価していたかを示す一つの事実を紹介しておきたいと思います。ボルツマンはマクスウエルの仕事がヨーロッパ大陸の研究者たちの間ではほとんど無視されていることを残念に思い、自ら筆をとり Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes と題する 2 巻の本を 1891 年から 93 年にかけて出版しました。